©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Beiträge zur Verwendung von Flechten als Bioindikatoren: Der Einfluß von Schadstoffkombinationen*)

Von Wolfgang Punz

Mit 6 Abbildungen und 3 Tabellen

(Vorgelegt in der Sitzung der mathem.-naturw. Klasse am 28. Juni 1979 durch das w. M. Wilhelm Kühnelt)

Inhaltsverzeichnis

I. Einleitung
II. Material und Methoden
III. Photosyntheseverlauf und Schadstoffwirkung
IV. Temperaturabhängigkeit der Photosynthese
V. Zum Wasserhaushalt schadstoffbelasteter Flechten
VI. Chlorophyllanalyse schadstoffbehandelter Flechten
VII. Besprechung der Ergebnisse
VIII. Zusammenfassung
IX. Literatur

I. Einleitung

Bei Untersuchungen, die sich mit der Wirkung von Immissionen auf Pflanzen befassen, stellt bereits die Frage nach dem Schadeffekt eines einzelnen Schadstoffs auf eine zu untersuchende Pflanze den Experimentator vor eine Reihe von Problemen. Zunächst ist der Schadstoffeinfluß nach Dauer, Art (kontinuierlich/intermittierend), Konzentration und möglicher Interaktion (mit anderen Noxen) zu definieren. Die Einwirkung auf die Pflanze wird modifiziert durch die ökologischen Gegebenheiten; ferner ist es notwendig, den Zustand (Vitalität, Resistenz) der Pflanze selbst zu beschreiben, wie er sich aus Art/Sorte, Alter, Jahreszeit, physiologischem Zustand und bisherigen Lebensbedingungen ergibt. Es ist weiters die Möglichkeit in Betracht zu ziehen, daß manche Schädigungen eventuell nur unter ganz bestimmten (Umwelt-)Bedingungen manifest werden. Zuletzt kann der Versuch gemacht werden, eine Klassifikation der Schadwirkung (z. B. Burian 1976, Härtel 1976) vorzunehmen.

*) Publ. Nr. 15 der MAB-Projektgruppe Stadtökologie.

I Po 156
LANDESMUSEUM
BIBLIOTHEK
Inv. Nr. P 30/1980

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Einen Sonderfall anthropogener Umweltbeeinflussung stellen, bedingt durch Stadtklima und Schadstoffe, die pflanzlichen Lebensbedingungen im urbanen Bereich („Ökosystem Großstadt") dar. Zu den Hauptkomponenten der urbanen Immissionssituation in Mitteleuropa zählen Blei, Salz und Schwefeldioxid (Literatur bei GARBER 1967, 1973, SUKOPP 1972, ZIEGLER 1973, HÖLL und HAMP 1974, KELLER 1974, ALTGAYER 1975, GSCHLIFFNER 1976, ROTHSCHEDL 1976, STEUBING 1977).

Die Empfindlichkeit von Flechten gegenüber Luftverunreinigungen ist bereits seit NYLANDER (1866) bekannt. Heute werden Flechten häufig als Indikatoren der Umweltverschmutzung (Flechtenkartierungen, Flechtentransplantate) eingesetzt (Literatur bei GILBERT 1973, JAMES 1973, RICHARDSON und PUCKETT 1973, HENSSEN und JAHNS 1974). Der Einfluß verschiedener Außenfaktoren, wie auch der noch nicht restlos aufgeklärte Flechtenmetabolismus, ist bei derartigen Untersuchungen jedenfalls in Rechnung zu stellen (PEARSON 1973, RIEDL 1978).

II. Material und Methoden

Material: Versuchsobjekt war die Flechte *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., bedingt durch reichliches Vorkommen einerseits sowie häufige Verwendung als Bioindikator.

Kultur- und Klimabedingungen: Die Flechten wurden grundsätzlich unmittelbar vor einem Versuch eingebracht, gewaschen und in offenen Petrischalen ausgelegt. Die Durchführung der Versuche erfolgte sodann in einem Klimaschrank der Fa. VÖTSCH (Ecophyt, Type 01/1000) unter standardisierten Bedingungen (12:12 h Tag, Beleuchtung 132 μEinstein . cm^{-2} . s^{-1} in Pflanzenhöhe, Temperatur 20° C – bzw. variiert zwischen 0 und 20° C, siehe unten –, relative Luftfeuchtigkeit zwischen 55 und 65 %, Wasserversorgung durch Befeuchten mittels A. dest. grundsätzlich einmal täglich).

Schadstoffbehandlung: **Blei:** Die Flechtenproben flotierten 18 h in Petrischalen auf einer 0,001 m Bleinitratlösung [$Pb(NO_3)_2$]. **Kochsalz:** Die Flechtenproben flotierten 18 h auf einer 0,001 m Kochsalzlösung (NaCl). **Schwefeldioxid:** Begasung nach der Methode HÄRTEL und MIKLAU (1971), d. h. durch Herstellen einer definierten SO_2-Konzentration mittels $NaHSO_3$-Präparats in einem abgeschlossenen System; Einwirkungsdauer: 3 h, Konzentration: 5 ppm. Kombination **Blei–Kochsalz:** Wie oben, unter Verwendung einer in bezug auf Bleinitrat 0,001 m, in bezug auf Kochsalz 0,001 m Lösung. Kombination **Blei–Schwefeldioxid:** Unmittelbar aufeinanderfolgende Behandlung mit Blei und Schwefeldioxid (wie oben beschrieben). Kombination **Kochsalz–Schwefeldioxid:** Unmittelbar aufeinanderfolgende Behandlung mit Kochsalz und Schwefeldioxid (ansonsten wie oben beschrieben). Kombi-

nation **Blei, Kochsalz und Schwefeldioxid:** Behandlung mit einer Kombination Blei–Kochsalz, unmittelbar gefolgt von einer Schwefeldioxidbegasung (ansonsten wie oben beschrieben). Bei dem in Abb. 2 beschriebenen Versuch schloß sich an die kombinierte Behandlung mit Blei–Schwefeldioxid eine weitere SO_2-Begasung (24 h später; 3 h, 5 ppm). Bei dem in Abb. 3 beschriebenen Experiment wurde eine SO_2-Konzentration von 500 ppm 3 Minuten lang geboten; alles andere wie oben beschrieben. Anschließend an jede der beschriebenen Schadstoffapplikationen wurden die Flechten mit A. font. (3 Minuten) und A. dest. (2 Minuten) gewaschen. Den Kontrollflechten wurde A. dest. geboten.

Gaswechselmessung: Messung der „apparenten Photosynthese" (= Bruttophotosynthese minus Summe der Atmung von Alge und Pilz) pH-metrisch (nur bei dem in Abb. 3 beschriebenen Versuch; nach LANGE 1956, WINTER unveröff.) bzw. mit einem URAS II der Fa. HARTMANN und BRAUN im geschlossenen System (Gesamtvolumen 398 cm^3). Für die Bestimmung der Photosyntheserate wurde der Bereich zwischen 350 und 250 ppm CO_2 herangezogen (vgl. auch WINTER 1975), bei extrem geschädigten Flechten mit sehr geringer Rate ein entsprechend engeres Intervall. Küvettierung in halbzylinderförmigen Glasküvetten nach ausreichendem Vorquellen und Abtupfen mittels Filterpapier (vgl. LANGE 1953, KÖHLE 1977). Ein Einfluß der Antrocknung im Meßzeitraum konnte in entsprechenden Vorversuchen nicht festgestellt werden (vgl. ENSGRABER 1954). Die Photosyntheseleistung wurde auf das Trockengewicht bezogen und in mg $CO_2 \cdot g$ Trockengew.$^{-1} \cdot h^{-1}$ berechnet. Für die in Kap. III. beschriebenen Versuche erfolgten die Messungen jeweils 1, 2, 4, 6, und 8 Tage nach Schadstoffapplikation. Es wurde jeweils der Gaswechsel aller Flechten im unbehandelten Zustand zuerst gemessen. Anschließend erfolgte die Schadstoffbehandlung der Flechten in Versuchsgruppen zu 3–4 Exemplaren (mit jeweils einer Kontrollgruppe). Zwischen der 3. und 12. Lichtstunde war keine Photosyntheseänderung im Tagesverlauf feststellbar; in dieser Zeit wurden auch die Messungen durchgeführt. Die Photosynthese am Versuchstag wurde in % des Ausgangswertes berechnet, die Photosynthesewerte einer Versuchsgruppe gemittelt, der Standardfehler für $p = 0{,}1$ berechnet, die Mittelwerte der behandelten Proben nach denjenigen der unbehandelten Proben korrigiert, und mehrfach reproduzierte Versuche gemittelt; für letztere Rechenvorgänge kam das Fehlerfortpflanzungsgesetz zur Anwendung (vgl. auch PUNZ, i. pr.). Signifikante Unterschiede ergaben sich für die Versuche a, d, e, g in Abb. 1. Um die in Kap. IV beschriebene Temperaturabhängigkeit der Photosynthese zu ermitteln, wurden die Flechten in Versuchsgruppen zu je 2–3 Proben geteilt. Nach einer Messung der Gaswechselrate bei Normalbedingungen (20° C) wurde die Temperatur des Klimaschranks in 5° C-Intervallen ge-

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

senkt. Vorversuche ergaben, daß sich bereits unmittelbar nach Erreichen der neuen Temperatur ein konstanter Gaswechselwert einstellt. Dennoch wurde eine Akklimatisierung von 50–60 Minuten abgewartet, sodann erfolgte die Messung, anschließend die Einstellung der nächstfolgenden Temperaturstufe usw. Die Versuche endeten bei 0° C. Gemessen wurde am 2./3. und am 6./8. Tag ab Schadstoffbehandlung. Als Bezugsgröße wurden unbehandelte Parallelproben am 4./5. Tag in der beschriebenen Weise gemessen. Vorversuche hatten ergeben, daß sich der Temperaturverlauf der Photosynthese unbehandelter Flechten im Verlauf einer Woche praktisch nicht änderte. Die Photosyntheserate der schadstoffbehandelten Flechten wurde prozentuell auf diejenigen der Kontrollflechten bezogen. Die Photosyntheserate der Kontrollflechten lag, absolut angegeben, stets zwischen 3,0 und 2,0 mg $CO_2 . g\ TG^{-1} . h^{-1}$. Kontrollversuche mit der verwendeten Nitratkonzentration ergaben, daß auf eine systematische Korrektur der Ergebnisse (vgl. FLÜCKIGER 1975) infolge der minimalen Abweichung von der Kontrolle verzichtet werden konnte.

Chlorophyllbestimmung und -auswertung: Extraktion aus luftgetrocknetem (48 h) Pflanzenmaterial, das mit Quarzsand zerrieben wurde (vgl. ZIEGLER und EGLE 1965, SCHOPFER 1970). Extraktionsmedium: 80 % Aceton, 20 % 0,3 m Ammoniaklösung. Messung der Absorption bei 534, 647, 664 und 720 nm mit einem Beckmann Acta Spektralphotometer. Berechnung des Chlorophyllgehalts, bezogen auf das Trockengewicht (= 91 % vom Gewicht des luftgetrockneten Materials, wie anhand von Parallelproben ermittelt wurde); des a/b-Verhältnisses; des R_t-Wertes (Extinktion bei 664 nm/Extinktion bei 534 nm). Die Proben wurden drei, sechs und neun Tage nach Schadstoffbehandlung genommen. Pro Versuchsgruppe wurden je drei Flechten (ca. 0,2 g pro Flechte) verwendet und die Ergebnisse gemittelt. Gegebenenfalls wurde nach dem Verhalten nitratbehandelter Parallelproben (0,002 m $NaNO_3$) folgendermaßen korrigiert: Die Abweichung der nitratbehandelten Flechten von den A. dest.-Proben wurde als Quotient ausgedrückt

$n = N/N_0$ N_0 = Kontrollwert der Nitratversuche
N = Wert der nitratbehandelten Probe

Der Kontrollwert der Schadstoffversuche wurde mit diesem Wert multipliziert:

$K_{korr} = K . n$ K = Kontrollwert eines Schadstoffversuchs

Durch dieses Verfahren ergab sich übrigens niemals eine Änderung im Verlauf des Schadmusters, lediglich quantitative Unterschiede konnten beobachtet werden.

Die Ergebnisse beider Versuchsserien (Frühjahr und Herbst) sind in Absolutwerten angegeben, müssen jedoch auch in Relation zur jeweiligen

Kontrolle gesehen werden, um eine adäquate Interpretation zu gewährleisten.

Bestimmung des Wassergehalts: Die Flechten wurden in destilliertem Wasser aufgesättigt, gewogen (wobei anhaftendes Wasser mittels Filterpapier entfernt wurde), sodann getrocknet und wieder gewogen. Kontrollproben mit KNO_3 zeigten eine geringfügige Steigerung des Wassergehalts; auf eine Korrektur wurde verzichtet (vgl. STOCKER 1956).

Klassifikation der Kombinationswirkungen nach BURIAN (1976):

1. „Synergismus": Gleichsinnige Auslenkung der Einzel-Wirkungen – gleichsinnige größere Auslenkung der Wirkungskombination.
2. „Antagonismus": Die Kombinationswirkung liegt „zwischen" den Einzelwirkungen.
3. „Überdeckung": Die Wirkung eines Agens macht einen zusätzlichen Einfluß eines zweiten (x-ten) Agens unmöglich oder unerkennbar.
4. „Wirkungs-Umkehr": Gleichsinnig auslenkende Noxen bewirken eine Auslenkung in der Gegenrichtung.

III. Photosyntheseverlauf und Schadstoffwirkung

Eine eingehendere Besprechung der diesbezüglichen Untersuchungen ist an anderer Stelle zu finden (vgl. PUNZ, i. pr.); um eine umfassende Betrachtung der Gesamtproblematik zu erleichtern, seien die diesbezüglichen Ergebnisse jedoch ergänzend rekapituliert (Abb. 1, 2). Es zeigt sich also nach isolierter Behandlung mit den Schadstoffen Blei, Kochsalz und Schwefeldioxid ein relativ typisches Schadbild im Photosynthesemuster (Abb. 1a–c). In der Kombination sind von den oben (Kapitel Material und Methodik) angeführten Möglichkeiten weder Antagonismus noch Wirkungs-Umkehr zu beobachten. Dagegen ist bei der Wirkung von Blei–Schwefeldioxid (Abb. 1e) ein Dominieren des Bleis, bei der Kombination Kochsalz–Schwefeldioxid (Abb. 1f) ein Dominieren des Schwefeldioxids festzustellen. Die Kombinationen Blei – Kochsalz (Abb. 1d) sowie die Dreierkombination (Abb. 1g) haben synergistische Schadwirkungen zur Folge (was besonders in Hinblick auf die Wirkungslosigkeit von isoliert gebotenem NaCl bemerkenswert erscheint). Im Anschluß an eine Grundbelastung mit Blei tritt sowohl bei mehrmaliger SO_2-Applikation mit geringeren Dosen (Abb. 2), wie auch bei einmaliger SO_2-Belastung hoher Konzentrationen (Abb. 3) ein synergistischer Effekt auf. Zieht man diese Ergebnisse in Betracht, so muß der letztgenannte Wirkungstyp wohl als der vorherrschende bezeichnet werden.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

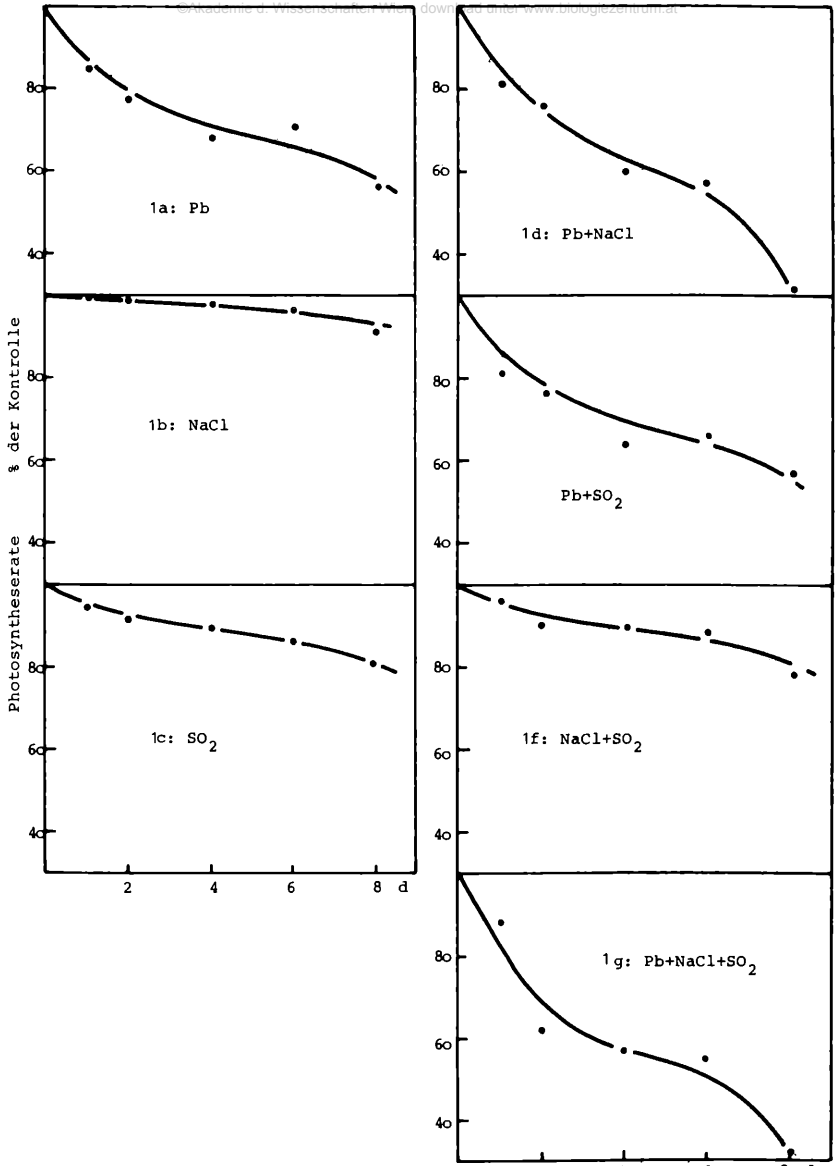

Abb. 1: Photosyntheseraten in % der Kontrolle (Daten aus PUNZ, i. pr.)
a) nach Behandlung mit 0,001 m Pb $(NO_3)_2$, 18 h,
b) nach Behandlung mit 0,001 m NaCl, 18 h,
c) nach Behandlung mit 5 ppm SO_2, 3 h,
d) nach kombinierter Behandlung mit Blei und Kochsalz (s. d.),
e) nach kombinierter Behandlung mit Blei und SO_2 (s. d.),
f) nach kombinierter Behandlung mit Kochsalz und SO_2 (s. d.),
g) nach kombinierter Behandlung mit Blei, Kochsalz und SO_2 (s. d.)

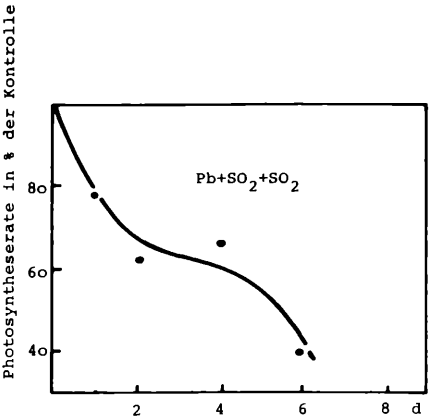

Abb. 2: Photosyntheserate in % der Kontrolle nach Behandlung mit Pb $(NO_3)_2$, 18 h, sowie jeweils 5 ppm SO_2, 3 h (unmittelbar anschließend bzw. 24 h danach); (Daten aus PUNZ, i. pr.)

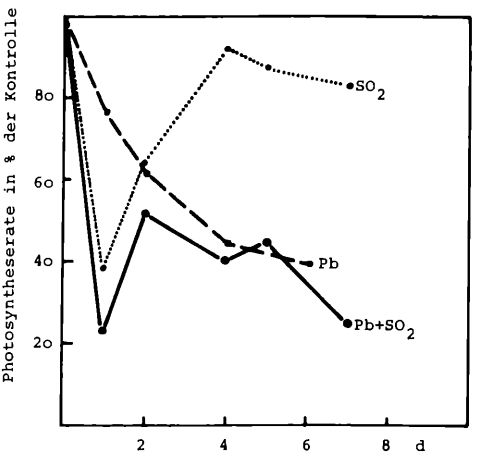

Abb. 3: Photosyntheseraten in % der Kontrolle nach Behandlung mit Blei („Pb"): 0,001 m Pb $(NO_3)_2$, 18 h
SO_2: 500 ppm, 5 min
„Pb + SO_2" (Kombination in unmittelbarer Aufeinanderfolge)

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

IV. Temperaturabhängigkeit der Photosynthese

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, kann der Einfluß der ökologischen Parameter (insbesondere Licht, Temperatur, Feuchtigkeit) auf die toxische Wirkung von Immissionen keineswegs als hinlänglich untersucht gelten, wiewohl sich verschiedene Arbeiten mit Aspekten dieses Problemkreises beschäftigen (u. a. REHWOLDT et al. 1972, TÜRK, WIRTH und LANGE 1974, WIRTH und TÜRK 1974, SCHUMM 1975, SEAWARD 1976, WESTMAN 1976, KÖHLE 1977, MAIER 1978, RIEDL 1978). In diesem Abschnitt sind daher einige Daten zur Temperaturabhängigkeit von Schadstoffen zusammengestellt.

Nach Behandlung mit Blei ist vor allem die relative Steigerung der Photosynthese am 3. Tag bei allen verwendeten Temperaturen mit Ausnahme der 20°-Messung auffallend. Vielleicht ist an eine Stoffwechselstimulation zu denken, die gelegentlich im Zusammenhang mit verschiedenen Schadstoffuntersuchungen beschrieben wird; fraglich bleibt, auf welcher Ebene des Metabolismus diese stattfindet (vgl. dazu MAIER 1978, Literatur daselbst). Nach 8 Tagen hingegen ist der Schadstoffeinfluß in allen Temperaturbereichen etwa gleichmäßig stark ausgeprägt (Abb. 4a).

Bei der Behandlung mit Kochsalz frappiert hier vor allem die deutlich erkennbar Erhöhung der Photosyntheserate bei den 20° C-Messungen, die sich am ersten Meßtag besonders klar zeigt. Auch hier muß wohl eine (im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter aufgeklärte) schadstoffbedingte Steigerung des Stoffwechsels angenommen werden (Abb. 4b).

Als Folge einer Behandlung mit Schwefeldioxid zeigt sich in fast allen Temperaturbereichen (nach zwei wie nach sechs Tagen) eine im Vergleich zur Kontrolle gesenkte Photosyntheserate (Abb. 4c).

Die Wirkung der Kombination Blei–Kochsalz ist vom Verlauf her durchaus mit derjenigen nach isolierter Bleiwirkung zu parallelisieren. Interessanterweise zeigt sich jedoch bei jeder untersuchten Temperatur eine ± starke Verminderung der Gaswechselrate gegenüber der Bleiwirkung, was umso bemerkenswerter ist, als das Kochsalz fast durchwegs einen stimulierenden Effekt zeigte, der gleichwohl in der Kombination nicht zum Tragen kommt: Dominieren des Bleieinflusses (Abb. 4d).

Behandlung mit Blei und Schwefeldioxid läßt die negative Wirkung einer kombinierten Schadstoffgabe wieder deutlich erkennen. In allen Temperaturbereichen liegt der Photosynthesewert noch unter demjenigen bei isolierter Blei- bzw. SO_2-Belastung: Synergismus (Abb. 4e).

Die kombinierte Behandlung mit Kochsalz und Schwefeldioxid zeitigt vom Verlauf eine Ähnlichkeit mit der Photosynthese isoliert kochsalzbehandelter Flechten. Die zusätzliche SO_2-Begasung hat jedoch of-

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

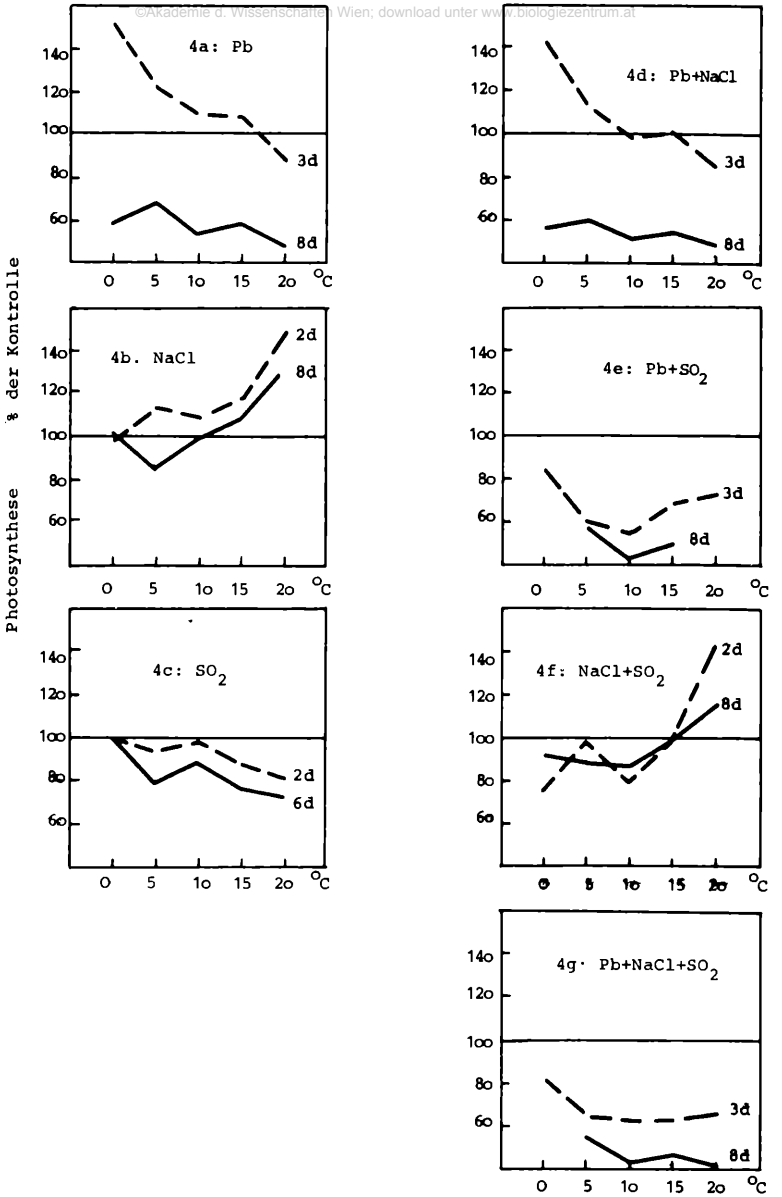

Abb. 4: Photosyntheseraten in % Kontrolle bei 5 Temperaturstufen; die Zahl der Tage nach Schadstoffbehandlung ist angegeben; a–g wie in Abb. 1.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

fenkundig eine Verschiebung zu geringeren Gaswechselraten bewirkt: Synergismus (Abb. 4f).

Erwartungsgemäß zeigt sich auch bei der Dreierkombination (Blei, Kochsalz, Schwefeldioxid) ein gegenüber der Kontrolle stark reduzierter Gaswechsel. Verglichen mit der Kombination Blei–Schwefeldioxid kann jedoch kaum eine weitere Verminderung der Photosynthese beobachtet werden: Synergismus (Abb. 4 g).

Als Kritik der Ergebnisse ist zunächst folgendes zu bemerken: Versucht man, die Gaswechselraten, die bei 20° C ermittelt wurden, mit den Werten bei PUNZ (i. pr.; vgl. Abschnitt III) in Beziehung zu setzen, so ist die Größenordnung als durchaus vergleichbar zu bezeichnen. Eine Ausnahme hiebei machen jedoch die Photosyntheseraten nach NaCl- bzw. NaCl-SO_2-Behandlung, die in der vorliegenden Arbeit weitaus höher liegen. Eine Entscheidung darüber, ob dieses Phänomen auf Versuchsfehler (insbesondere ist die Probenzahl in Rechnung zu stellen) oder auf andere Gründe (etwa einen jahreszeitlich bedingten Unterschied des Flechtenmetabolismus, o. ä.) zurückzuführen ist, kann hier nicht getroffen werden. Von den vorliegenden Versuchen wurden die Messungen nach Schadstoffbehandlung mit Blei und Kochsalz wiederholt; die Ergebnisse sind als vergleichbar zu bezeichnen. Die relativ geringe Zahl der Proben stellt fraglos einen Mangel dar. Es sei jedoch angemerkt, daß methodische Gründe die Anzahl der Einzelversuche zwangsläufig beschränken. Denn die Notwendigkeit, in Folge der fortschreitenden Schadstoffwirkung den ganzen zu untersuchenden Temperaturbereich (0–20° C) in möglichst kurzer Zeit durchzutesten, läßt eine wesentliche Steigerung der Probenzahl bei der verwendeten Methodik nicht zu.

Wie bereits zuvor erwähnt wurde, findet man beim Studium der einschlägigen Literatur nur wenige Angaben, die sich mit der Rolle der Temperatur bei der Einwirkung von Schadstoffen befassen. Dies gilt für den Bereich der Flechtenforschung, wo das Temperaturverhalten intakter Lichenen außerordentlich intensiv untersucht wurde, die Beziehung Schadstoffwirkung – Temperatur hingegen noch recht wenig bearbeitet ist (vgl. dazu etwa TÜRK, WIRTH und LANGE 1974, WIRTH und TÜRK 1974, SCHUMM 1975); das gleiche gilt jedoch, von wenigen Ausnahmen abgesehen, auch für den ganzen Bereich der Immissionsforschung (vgl. MAIER 1978, Literatur daselbst).

Versucht man also, die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zu erklären, so ist festzuhalten, daß die Experimente zwei bis acht Tage nach Schadstoffbehandlung stattfanden, d. h. auch wenn man annimmt, daß ein Teil der toxischen Substanzen lediglich adsorbiert wurde, ist es in den kurzen Meßzeiten nahezu auszuschließen, daß ein temperaturabhängiger Aufnahmeprozeß eine Rolle spielen könnte. Die Ursachen für die

Temperaturabhängigkeit von Phänomenen sind deshalb wohl im enzymatischen Bereich zu suchen. Zu den Ergebnissen im einzelnen ist zunächst zu bemerken, daß eine Steigerung der Photosynthese, wie sie drei Tage nach Behandlung mit Blei bzw. Blei–Kochsalz auftritt, relativ selten dokumentiert ist. Lediglich bei CARLSON et al. (1975) findet sich ein entsprechender Hinweis; die von MAIER (1978) referierten Versuchsergebnisse über Aktivitätssteigerungen von Enzymen weisen jedoch offenbar in die gleiche Richtung. Mit der Möglichkeit einer Photosynthesesteigerung durch Kochsalz war prinzipiell zu rechnen (z. B. LAPINA 1973); warum diese im höheren Temperaturbereich auftritt, während nach Bleigabe die Produktion bei niedrigen Temperaturen gefördert wird, ist zur Zeit noch nicht erklärlich. Die Assimilationsdepression nach SO_2-Einfluß hingegen war von der Literatur her zu erwarten (RICHARDSON und PUCKET 1973). Die Vorstellung, daß Schadstoffeinwirkung in einem „unteren" Bereich stimulierend wirken kann, dieser Effekt jedoch bei höheren Konzentrationen, längerer Einwirkungsdauer u. dgl. abnimmt und einer negativen Wirkung Platz macht, scheint insbesondere durch die Kombination Blei–Schwefeldioxid sowie die Dreifachkombination gestützt zu werden. Der Einfluß von Blei (isoliert geboten: stimulierend) und Schwefeldioxid (isoliert geboten: schwach schädigend) schließlich zeigt in Kombination nur mehr negative Folgen für den Gaswechsel. Nach acht Tagen hat – bei den verwendeten Konzentrationen und Einwirkungszeiten – die Ausprägung der Temperaturabhängigkeit stark abgenommen. Es darf vermutet werden, daß nach dieser Zeit auch die Enzyme/Isoenzyme für den Bereich tieferer Temperaturen geschädigt worden sind.

V. Zum Wasserhaushalt schadstoffbelasteter Flechten

Auch für diesen Abschnitt gilt das unter III. Gesagte: daß nämlich eine Besprechung der Ergebnisse bereits an anderer Stelle (PUNZ, in pr.) zu finden ist, die Untersuchungen jedoch (im Hinblick auf eine umfassende Besprechung der gesamten Problematik) hier rekapituliert seien. Wie aus der Literatur bekannt, spielt der Wasserhaushalt der Flechten insbesondere für ihr Photosynthesevermögen eine wichtige Rolle (BUTIN 1954, SMITH 1962, LANGE 1969, FARRAR 1973). Demgegenüber ist die Zahl der Untersuchungen, die eine Beziehung zwischen den genannten Größen bei schadstoffbelasteten Flechten herzustellen versuchen, noch relativ gering (KÖHLE 1977, TÜRK und CHRIST 1978). Auch die hier vorgelegten Ergebnisse zielten zunächst nur darauf ab, Aufschluß über die Zweckmäßigkeit weiterer Experimente in dieser Richtung zu erhalten.

In Abb. 5 ist die Korrelation von Wassergehalten und Photosyntheseraten schadstoffbelasteter Flechten (Daten aus PUNZ, in pr.) dargestellt. Die Gesamtkorrelation (Gerade A in der Abbildung) zeigt nur einen

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

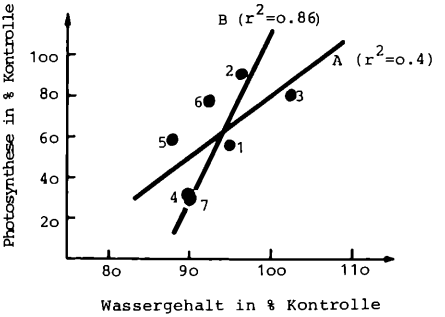

Abb. 5: Korrelation von Wassergehalt (in % Kontrolle) und Photosynthese (in % Kontrolle) schadstoffbehandelter Flechten. Die Zahlen 1–7 entsprechen den in Abb. 1 angegebenen Kombinationen (a–g); (Daten aus PUNZ, i. pr.)

relativ schwachen Zusammenhang zwischen den genannten Größen. Die Wirkung der Einzelschadstoffe ist unterschiedlich: SO_2 hat eine leichte Steigerung des Wassergehalts zur Folge, während Blei und Kochsalz denselben senken. Berechnet man eine Regression lediglich aus Werten, die keine Kombination mit SO_2 (bzw. Schwefeldioxid selbst) beinhalten, so steigt die Signifikanz (r^2) auf 0,86. Es sind verschiedene Gründe für dieses Verhalten denkbar, etwa eine Schädigung der Membranen (KÖHLE 1977), oder auch eine geringere Imprägnierung der Hyphen mit hydrophoben Substanzen (SIEVERS cit. HENNSEN und JAHNS 1974). Von der Literatur her wird die Frage, ob schadstoffbehandelte Flechten eine erhöhte oder verminderte Wasserkapazität besitzen, unterschiedlich beantwortet (KÖHLE 1977, TÜRK und CHRIST 1978). Die vorliegenden Ergebnisse scheinen demgegenüber darauf hinzuweisen, daß bei verschiedenen Schadstoffen sowohl der eine wie auch der andere Effekt auftreten kann, und lassen weiterführende diesbezügliche Untersuchungen als durchaus vielversprechend erscheinen.

VI. Chlorophyllanalyse schadstoffbehandelter Flechten

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sind pflanzliche Farbstoffe schon früh als Indikatoren für Schadstoffe bzw. deren Wirkung angesehen worden (THÜMMLER 1941, MÜLLER 1957). Zum einen freilich ist jedoch bekannt, daß pflanzliche Pigmente auch auf mehr oder minder natürliche Umweltänderungen („Streß" s. lat.) reagieren können; zum anderen ist die Anzahl der Reaktionsmöglichkeiten auf Schadstoffeinfluß zweifellos begrenzt, was eine spezifische Diagnose auf Grund von Farbstoffanalysen in allen jenen Fällen erschwert, in denen nicht ein einzelner Schadstoff eindeutig dominiert (vgl. dazu ARNDT 1971, FERENS und BEYERS 1972,

BAUER und GRILL 1977). Hingegen wird ein gezielter Einsatz von Pigmentuntersuchungen, der Hand in Hand mit anderen bioindikativen Untersuchungsmethoden gehen sollte, zweifellos auch weiterhin seine Berechtigung behalten (vgl. FLÜCKIGER 1975, MAIER 1978).

Ziel der in diesem Abschnitt beschriebenen Arbeiten war es, bei einer Laubflechte das Reaktionsmuster von drei ausgewählten Chlorophyllparametern auf isoliert und kombiniert gebotene urbane Noxen zu ermitteln.a/b-Verhältnis und Chlorophyllgehalt werden häufig im Rahmen der Immissionsforschung – auch bei Flechten – untersucht, so daß ihre Verwendung nahelag. Der R_t-Wert wurde ursprünglich von ZIEGLER und EGLE (1965) zur Kontrolle des Phäophytingehalts von Extraktionen eingeführt und ist eine Verhältniszahl, die die Beziehung von Chlorophyll a und Phäophytingehalt wiedergibt. Je höher der R_t-Wert, desto geringer ist also der Phäophytinanteil der Probe (bei ZIEGLER und EGLE 1965 wurden methodisch alle Extrakte mit einem R_t-Wert größer als 14,5 als phäophytinfrei angesehen).

Nach Behandlung mit Blei sinkt das a/b-Verhältnis beider Serien nach schwachem Anstieg auf etwa 90 % der Kontrolle; absolut betrachtet, handelt es sich freilich nur um ein Ansteigen der Kontrollwerte im Laufe der Woche. Der R_t-Wert ist nach neun Tagen bei der Maiserie deutlich, bei der Novemberserie geringfügig gesenkt, wobei auch absolut ein Abfall der verbleiten Proben feststellbar ist. Der Chlorophyllgehalt zeigt einen ausgeprägten prozentuellen Anstieg, dem jedoch nur ein geringer absoluter Anstieg, verbunden mit einem starken Abfall der Kontrollwerte, gegenübersteht (Tab. 1a, 2a, 3a).

In der Folge einer Behandlung mit Kochsalz „pendeln" a/b-Verhältnis und Chlorophyllgehalt um die Kontrolle; der R_t-Wert zeigt (abgesehen von einem „peak" am 6. Tag der Juniserie) ein ähnliches Verhalten (Tab. 1b, 2b, 3b).

Nach Behandlung mit Schwefeldioxid ist wohl am deutlichsten ein (offenkundig jahreszeitlich bedingter) Unterschied zwischen den beiden Serien festzustellen. Während die Novemberserie einen Anstieg des R_t-Werts und einen verringerten Chlorophyllgehalt aufweist, ist im April der R_t-Wert wenig verändert, der Chlorophyllgehalt hingegen erhöht. Das a/b-Verhältnis zeigt keine deutliche Veränderung (Tab. 1c, 2c, 3c).

Kombinierte Behandlung mit Blei und Kochsalz bewirkt eine Verringerung von a/b-Verhältnis und R_t-Wert (wieder weniger deutlich bei der Novemberserie); der Chlorophyllgehalt dagegen steigt. Insgesamt bietet sich ein Bild, das der isolierten Bleiwirkung durchaus vergleichbar ist (Tab. 1d, 2d, 3d).

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Die kombinierte Behandlung mit Blei und Schwefeldioxid hat im großen und ganzen ein ähnliches Muster wie nach isolierter Bleigabe zur Folge: Gesenkter R_t-Wert, vermindertes a/b-Verhältnis, Anstieg des Chlorophyllgehalts (wobei speziell die Werte der Novemberserie jedoch deutlich davon abweichen) (Tab. 1e, 2e, 3e).

Nach kombinierter Behandlung mit Kochsalz und Schwefeldioxid ist der R_t-Wert am 9. Tag auf etwa 80 % der Kontrolle zurückgegangen. Das Verhalten der beiden anderen Parameter ist dagegen wieder am besten als ein „Pendeln um die Kontrolle" zu bezeichnen (Tab. 1f, 2f, 3f).

Bei kombinierter Behandlung mit allen drei Schadstoffen zeigt sich wiederum eine starke Ähnlichkeit mit der isolierten Bleiwirkung: R_t-Wert und a/b-Verhältnis sind gesenkt, der Chlorophyllgehalt dagegen ist erhöht (Tab. 1g, 2g, 3g).

Betrachtet man die isolierten Schadstoffwirkungen, so läßt sich nach Bleieinfluß zunächst eine Senkung des a/b-Verhältnisses wie auch des R_t-Wertes feststellen. Obwohl nur wenig Literatur über die Wirkung von Blei auf den Farbstoffapparat von Flechten vorliegt, und auch bei höheren Pflanzen unser diesbezügliches Wissen begrenzt ist, so erscheint dieses Ergebnis nicht unerwartet. Tatsächlich ist ja bekannt, daß die meisten Streßsituationen eine Verminderung des a/b-Verhältnisses hervorrufen; nimmt man noch an, daß die Bleigabe einen Pigmentabbau (als Primär- oder Sekundärwirkung) zur Folge haben könnte, so wäre auch das Verhalten des R_t-Werts durchaus erklärbar. Schwer begreiflich erscheint hingegen zunächst die massive relative Steigerung des Chlorophyllgehalts. Prinzipiell ist der Einfluß von Blei auf die Chlorophyllbiosynthese – wenn auch nur mit negativer Wirkung – bekannt (HAMPP und ZIEGLER 1974). Es muß jedoch mit der Möglichkeit gerechnet werden, daß das Blei (wie auch andere Schadstoffe) kurzfristig eine Stimulation des Stoffwechsels (und damit eventuell auch der Chlorophyllsynthese) zur Folge haben könnte. Diese Annahme würde durch die Untersuchungen von TAYLOR und EATON (1966) an NO_2, von DE KONING und JEGIER (1970) an SO_2/O_3, sowie durch die Arbeiten von FLÜCKIGER (1975) und MAIER (1978) an Enzymen gestützt. Erwartungsgemäß zeigt das Kochsalz in der verwendeten Konzentration wenig Wirkung. Auch der Effekt des isoliert gebotenen Schwefeldioxids ist im vorliegenden Fall gering; offensichtlich ist die verwendete Einwirkungsdauer zu kurz, um die in der Literatur (RICHARDSON und PUCKETT 1973) beschriebenen Folgewirkungen zu zeigen. Das Phänomen der jahreszeitlichen Unterschiede der Schadstoffwirkung wird anderswo besprochen werden (PUNZ, in Vorb.).

Die Kombinationswirkungen der drei Schadstoffe werden nach dem Schema von BURIAN (1976) klassifiziert. Bei der Kombination Blei–Kochsalz muß für alle drei Parameter von einer Überdeckung durch

die Bleiwirkung gesprochen werden. Der Schadverlauf bei der Kombination Blei–Schwefeldioxid ist im großen und ganzen ebenfalls von einer Überdeckung durch die Bleiwirkung geprägt. Die Kombination Kochsalz–Schwefeldioxid bietet, wie die beiden Einzelwirkungen, das Bild eines „Pendelns" um die Kontrolle. Die Kombination aller drei Schadstoffe ist (von Abweichungen, insbesondere bei den R_t-Werten, abgesehen) wieder durch Dominieren des Bleieinflusses geprägt.

Versucht man, eine Beziehung zwischen der Photosynthese von kombiniert behandelten Flechten (vgl. auch Abschnitt III) und den vorliegenden Chlorophyllwerten herzustellen, so besteht zunächst keine Parallele zwischen dem Chlorophyllgehalt und der Gaswechselrate. Die Annahme liegt nahe, daß auch Flechten – trotz ihres niedrigen Chloro-

Tabelle 1: *a/b-Verhältnis von Flechten nach Schadstoffbehandlung, zwei Serien (die römischen Ziffern geben jeweils den Versuchsmonat an); Schadstoffbehandlung (a–g) siehe Text (bzw. Abb. 1)*

	V	XI	V	XI	V	XI
Pb	4,88	5,25	4,78	4,66	4,77	5,05
Ktr	4,65	4,62	5,52	5,19	5,49	5,22
	VI	XI	VI	XI	VI	XI
b: NaCl	5,25	4,87	5,43	4,63	4,96	4,69
Ktr	5,23	4,82	5,36	4,75	4,88	4,67
	IV	XI	IV	XI	IV	XI
SO_2	5,09	5,07	5,09	5,16	5,05	4,79
Ktr	5,29	4,97	5,23	4,90	5,25	4,92
	V	XI	V	XI	V	XI
d: Pb+NaCl	4,72	5,00	4,66	4,76	4,55	4,68
Ktr	4,65	4,62	5,52	5,19	5,49	5,22
	VI	XI	VI	XI	VI	XI
Pb+SO_2	5,29	5,08	5,00	4,79	4,79	4,54
Ktr	4,85	4,62	5,91	5,19	5,38	5,22
	VI	XI	VI	XI	VI	XI
f: NaCl+SO_2	5,24	5,27	4,95	4,71	4,78	4,76
Ktr	5,23	4,82	5,36	4,75	4,88	4,67
	VI	XI	VI	XI	VI	XI
g: Pb+NaCl+SO_2	5,14	5,11	4,74	4,82	4,98	4,78
Ktr	4,85	4,48	5,91	5,04	5,38	4,95

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

phyllgehalts, der um etwa eine Zehnerpotenz unter demjenigen von höheren Pflanzen liegt – keine derart unmittelbare Beziehung zwischen Pigmentgehalt und Produktion zeigen (vgl. VERSEGHY 1972; aber BÜTTNER 1971). Dagegen ist das a/b-Verhältnis am 6./9. Tag (insbesondere bei der Frühjahrsserie) zumindest grob (d. i. in Relation zur Kontrolle bzw. zueinander) mit den entsprechenden Photosynthesekurven zu korrelieren (vgl. prinzipiell zu diesem Problem auch WINTER 1975).

Tabelle 2: *Chlorophyllgehalt von Flechten nach Schadstoffbehandlung (in mg Chl. g TG^{-1}), zwei Serien (die römischen Ziffern geben jeweils den Versuchsmonat an); Schadstoffbehandlung (a–g) siehe Text*

	V	XI	V	XI	V	XI
a: Pb	1,50	1,44	1,78	1,74	1,71	1,35
Ktr	1,58	1,69	1,37	1,33	1,05	1,02
	VI	XI	VI	XI	VI	XI
b: NaCl	1,31	1,64	1,46	1,79	1,13	1,30
Ktr	1,39	1,86	1,27	1,71	1,30	1,42
	IV	XI	IV	XI	IV	XI
SO_2	1,50	1,18	1,54	1,10	1,44	1,44
Ktr	1,30	1,49	1,44	1,42	1,16	1,41
	V	XI	V	XI	V	XI
d: Pb+NaCl	1,48	1,78	1,59	1,74	1,54	1,58
Ktr	1,58	1,69	1,37	1,33	1,05	1,02
	VI	XI	VI	XI	VI	XI
Pb+SO_2	0,95	1,62	1,37	1,39	1,12	1,29
Ktr	1,19	1,69	0,99	1,33	0,81	1,02
	VI	XI	VI	XI	VI	XI
f: NaCl+SO_2	1,47	1,58	1,44	1,61	1,32	1,44
Ktr	1,39	1,86	1,27	1,71	1,30	1,42
	VI	XI	VI	XI	VI	XI
g: Pb+NaCl+SO_2	0,89	1,48	1,13	1,55	1,16	1,36
Ktr	1,19	2,11	0,99	1,60	0,81	1,03

Tabelle 3: *R_f-Wert von Flechten nach Schadstoffbehandlung, zwei Serien (die römischen Ziffern geben jeweils den Versuchsmonat an); Schadstoffbehandlung (a–g) siehe Text*

	V	XI	V	XI	V	XI
Pb	10,6	11,2	9,3	11,0	8,8	10,7
Ktr	11,4	10,3	11,5	11,1	14,0	11,2
	VI	XI	VI	XI	VI	XI
b: NaCl	14,2	12,5	16,8	12,2	10,1	10,1
Ktr	12,9	12,2	12,3	14,2	11,2	11,5
	IV	XI	IV	XI	IV	XI
SO_2	14,3	12,6	16,1	15,4	12,3	10,9
Ktr	18,7	11,0	14,0	11,2	13,3	10,2
	V	XI	V	XI	V	XI
d: Pb+NaCl	10,3	12,3	8,4	11,3	8,4	9,7
Ktr	11,4	10,3	11,5	11,1	14,0	11,2
	VI	XI	VI	XI	VI	XI
Pb+SO_2	10,2	12,7	10,8	9,5	9,4	10,0
Ktr	13,1	10,3	15,4	11,1	14,0	11,2
	VI	XI	VI	XI	VI	XI
f: NaCl+SO_2	14,4	13,3	13,6	11,0	10,0	8,7
Ktr	12,9	12,2	12,3	14,2	11,2	11,5
	VI	XI	VI	XI	VI	XI
g: Pb+NaCl+SO_2	9,2	13,0	10,3	11,2	9,8	10,0
Ktr	13,1	11,4	15,4	14,2	14,0	12,7

VII. Besprechung der Ergebnisse

Wiewohl jede Untersuchung zur Wirkung von Schadstoffen auf die Physiologie von Flechten auch als ein Beitrag zur Grundlagenforschung auf diesem Gebiet klassifiziert werden kann, so ist es doch die praktische Verwendbarkeit dieser Organismen für die Zwecke der Bioindikation, die gewöhnlich im Vordergrund der Betrachtung steht. In Folge der weltweiten Verbreitung des volatilen Bleis in der Gegenwart (um ein Beispiel zu nennen) kann freilich nicht mehr nur das Schwefeldioxid als einzig relevanter Schadstoff für das Vorkommen von Flechten angesehen werden; dennoch muß der kombinierte Einfluß der drei untersuchten Schadstoffe vor allem für die Situation transplantierter Flechten als typisch charakterisiert werden. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung sind daher auch vorzüglich unter diesem Aspekt zu sehen, nämlich: eine zunehmend

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

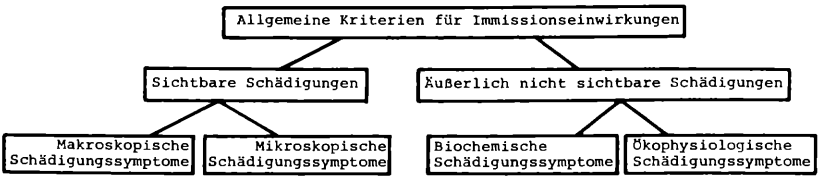

Abb. 6: „Kriterien für Immissionseinwirkung" (Schema nach STEUBING 1977)

differenzierte Auswertung von Flechten als Bioindikatoren der Umweltverschmutzung experimentell zu ergänzen und abzusichern.

Zieht man die „Kriterien für Immissionseinwirkungen" bei STEUBING (1977) zur Einordnung der vorliegenden Untersuchungen heran (Abb. 6), so sind letztere formal zu 2.2. „Ökophysiologische Schädigungssymptome" zu stellen. Es wurden die folgenden Parameter untersucht:

Photosyntheserate (Pn)
Wassergehalt (WC)
Chlorophyll: R_t-Wert
a/b-Verhältnis
(a + b)/TG (Chlorophyllgehalt),

und (teilweise) als Funktion von Schadstoffbelastung (S), Temperatur (T) und Zeit nach Schadstoffbelastung (t) dargestellt, wobei die relative Luftfeuchtigkeit (RH) und die Beleuchtungsintensität (L) konstant blieben:

$$(a+b)/TG,\ R_t,\ a/b,\ Pn,\ WC = f(S,\ T,\ t) \qquad RH,\ L = \text{konstant}$$

Ergänzt man schließlich, daß es sich um Laborexperimente handelt (was eine mehr prinzipiell orientierte Fragestellung, zum Unterschied von Freilandversuchen, impliziert), und vergegenwärtigt man sich die in der Einleitung rekapitulierten Fragestellungen, so ist der Stellenwert der vorliegenden Untersuchung damit einigermaßen geklärt. Auf dieser Grundlage kann eine Besprechung der Ergebnisse erfolgen.

Von den Chlorophylluntersuchungen der vorgestellten Arbeit waren keine grundsätzlich neuen Erkenntnisse zur Problematik der Pigmentanalyse als Schadensdiagnose (vgl. FERENS und BEYERS 1972, BERRY 1975, BAUER und GRILL 1977) zu erwarten. Nichtsdestoweniger seien hier einige interessante Aspekte rekapituliert. So stellt der Einsatz des R_t-Werts als Parameter für die Schadstoffindikation zweifellos eine interessante (weil relativ einfache) Möglichkeit für Freilanduntersuchungen dar (was freilich die starke jahreszeitliche Abhängigkeit dieser Größe wieder problematisch erscheinen lassen mag). Die Untersuchung des a/b-Verhältnis-

ses erbrachte Daten, die den von der Schadstoffliteratur her gegebenen Erwartungen entsprachen (vgl. Kap. VI). Die (relative) Steigerung des Chlorophyllgehalts wäre für die angeführten Experimente nur zum Teil durch ein vermindertes Regulations- bzw. Adaptationsvermögen der schadstoffbelasteten Flechten (an die Laborbedingungen) zu erklären. Es bleibt das Faktum einer absoluten Erhöhung des Chlorophyllgehalts, das zwar in der Literatur nicht völlig isoliert dasteht (s. Kap. VI; vgl. Werte akut SO_2-behandelter Nadeln bei BAUER und GRILL), aber dennoch weiterer Untersuchungen wert erscheint.

Die Photosynthese schadstoffbelasteter Flechten ist zwar bereits seit einiger Zeit auf ihre Verwendbarkeit für bioindikative Zwecke geprüft worden (Literatur bei TÜRK et. al. 1974, SCHUMM 1975, KÖHLE 1977, STEUBING 1977, WINKLER 1977). Gerade der Parameter „Temperatur" und seine Wirkung auf die Photosyntheserate – wiewohl auch von uns keineswegs erschöpfend behandelt – scheint in der vorliegenden Literatur noch relativ unbearbeitet geblieben zu sein. Tatsächlich zeigt sich (besonders am ersten Meßtag, d. i. 2–3 Tage nach Schadstoffbehandlung) eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit der Immissionswirkung. (Daß damit auch eine Verschiebung des Temperaturoptimums parallel läuft, sei hier nur angemerkt.) Die Schädigung (Ausnahme: NaCl, NaCl + SO_2) erfolgt im allgemeinen im Bereich höherer Temperaturen, was (vorbehaltlich der notwendigen Verifizierung durch spätere Untersuchungen) mit einer akuten Schädigung im jeweils aktiven Reaktionsbereich (i. e. unter den Laborbedingungen eben 20° C) interpretierbar wäre. Dieser Vermutung würde auch die „Ausweitung" der Schadwirkung auf niedere Temperaturbereiche (nach 6–8 Tagen) nicht widersprechen; eine experimentelle Bestätigung wäre jedoch, wie bereits erwähnt, noch vonnöten. Von großer Bedeutung erscheint uns auch das überaus deutliche Schad„muster" der untersuchten Schadstoffe auf die Photosynthese (Kap. III), welches die Hoffnung bestärkt, auf diesem Wege einer Differenzierung von Schadstoffwirkungen in Freilandstudien näherzukommen (vgl. PUNZ, i. pr.). Für letzteres – nämlich die Möglichkeit einer differenzierten Analyse von Freilandversuchswerten – würden auch jene (noch wenig umfangreichen) Ergebnisse (Kap. V) von Nutzen sein, welche die Beziehung von Schadwirkung und Wassergehalt zum Inhalt haben. Die angeführte Parallelität von vermindertem Wassergehalt und verminderter Photosyntheserate nach Pb/NaCl-Belastung könnte einen evtl. gangbaren Weg zum „Auseinanderhalten" der Wirkung verschiedener Noxen im Freilandversuch weisen (vgl. PUNZ, i. pr.).

Es erscheint unerläßlich, auch eine Anmerkung zur Frage der Kombinationswirkung von Schadstoffen anzufügen. Die Bioindikation durch Flechten (insbesondere die Transplantatmethode) nutzt zwar die Tatsa-

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

che, daß die Schadreaktion immittierter Flechten quasi ein „Integral" über die Gesamtbelastung aller phytotoxischen Substanzen darstellt; die Spezifikation der Wirkung einzelner Schadstoffe wie auch ihrer Kombination muß jedoch von ergänzenden Laborversuchen abhängen. Unter diesem Gesichtspunkt erscheinen daher die folgenden Ergebnisse (ausgehend vom Grundmuster, das die isolierte Applikation von Blei, Kochsalz und Schwefeldioxid liefert, und immer unter der Einschränkung, daß die gemachten Angaben selbstverständlich nur für die verwendeten Dosen gelten und gelten können) von einigem Interesse (vgl. auch PUNZ, i. pr.):

- Von dem bei BURIAN (1976) referierten Wirkungsschema sind nur die beiden Möglichkeiten „Überdeckung" und „Synergismus" zu beobachten.
- Die Kombination Blei–Kochsalz zeigt bei der Photosynthese eine unerwartete Verstärkung der Bleiwirkung durch das (isoliert geboten ± unschädliche) Kochsalz.
- Die Kombination Blei-Schwefeldioxid hat eine massive, „synergistische" Schadwirkung auf die Photosynthese zur Folge (vgl. auch KRAUSE und KAISER 1977). Ein gleiches gilt für die Dreifachkombination der Schadstoffe.
- Bei den untersuchten Chlorophyllparametern sind demgegenüber Kombinationseffekte weniger ausgeprägt.
- Von (beschriebenen) Einzeleffekten abgesehen und unbeschadet der verschiedenen, noch aufklärungsbedürftigen Phänomene, können die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung als grundsätzlich kompatibel betrachtet werden.

Das bisher Gesagte scheint also die folgenden Konsequenzen für den weiteren Einsatz von Flechten als Bioindikatoren nahezulegen:

1. Ergänzend zu den bisherigen Untersuchungen (Literatur bei TÜRK et al. 1974, SCHUMM 1975, KÖHLE 1977, STEUBING 1977, WINKLER 1977) ist der Frage der Temperaturabhängigkeit von Schadstoffwirkungen mehr Platz einzuräumen; insbesondere ist bei der Auswertung von Freilanduntersuchungen auf dieses Problem Rücksicht zu nehmen.
2. Die unter III. behandelten Schad„muster" der Photosynthese sowie die unter V in Hinblick auf den Wassergehalt schadstoffbelasteter Flechten erzielten Ergebnisse scheinen erfolgversprechende Ansätze für weitere Untersuchungen, vor allem im Hinblick auf eine bessere Differenzierung von Schadwirkungen nach beteiligten Einzelschadstoffen, darzustellen.
3. Eine physiologische Erklärung für zahlreiche Ergebnisse steht (ein typisches Phänomen bei der wesentlich praxisbezogenen Bioindikationsforschung) noch aus.

4. Der sorgfältigen und möglichst umfassenden Beachtung der Probleme, die untrennbar mit der Verwendung von Flechten als Bioindikatoren verbunden sind – wie jahreszeitliche Effekte, substratbedingte, trophische, klimatisch/mikroklimatisch/ökologische Faktoren u. dgl. (vgl. Einleitung; GILBERT 1970, KIRSCHBAUM et al. 1971, JÜRGING 1972, 1975, FARRAR 1973, PEARSON 1973, MÜLLER et al. 1976, KÖHLE 1977, WINKLER 1977, RIEDL 1978) –, kommt weiterhin wesentliche Bedeutung bei Ansatz und Auswertung der entsprechenden Untersuchungen zu.

VIII. Zusammenfassung

1. An der Flechte *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. wurde der Einfluß von Blei, Kochsalz und Schwefeldioxid, isoliert und kombiniert geboten, auf verschiedene Parameter (Photosynthese, Chlorophyll, Wassergehalt) untersucht.

2. Auf der Basis der Ergebnisse der Einzelbelastung mit Schadstoffen wurde die Kombinationswirkung nach dem Schema von BURIAN (1976) klassifiziert; es konnten nur die Möglichkeiten „Synergismus" und „Überdeckung" beobachtet werden.

3. Die gewonnenen Ergebnisse werden in Hinblick auf die Verwendung von Flechten als Bioindikatoren besprochen. Insbesondere wird auf die Frage der Temperaturabhängigkeit von Schadstoffwirkungen hingewiesen. Die Werte von Photosynthese und Wassergehalt könnten positive Ansätze für eine weitere, differenziertere Auswertung von Flechten als Bioindikatoren darstellen.

Dank: Herrn Univ.-Prof. Dr. K. BURIAN danke ich für seine Unterstützung. Der Österreichischen Akademie der Wissenschaften sowie dem Magistrat der Stadt Wien gebührt Dank für die finanzielle Förderung des Projekts.

IX. Literatur

ALTGAYER, M., 1975: Biometrische Untersuchungen an stadtbewohnenden Pflanzen. Hausarbeit Naturgeschichte, Institut für Pflanzenphysiologie, Universität Wien.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

ARNDT, U., 1971: Konzentrationsänderungen bei Blattfarbstoffen unter dem Einfluß von Luftverunreinigungen. Ein Diskussionsbeitrag zur Pigmentanalyse. Environ. Pollut. *2* (1), 37–48.

BAUER, I., GRILL, D., 1977: Zur Problematik der Pigmentanalyse als Rauchschadensdiagnose. Angew. Botanik *51*, 241–250.

BERRY, J. A., 1975: Adaptation of photosynthetic processes to stress. Science *188*, 644–650.

BÜTTNER, R., 1971: Untersuchungen zur Ökologie und Physiologie des Gasstoffwechsels bei einigen Strauchflechten. Flora *160*, 72–99.

BURIAN, K., 1976: Kombinationswirkungen von Umweltgiften auf pflanzliche Organismen. Umschau in Wissenschaft und Technik *76* (11), 351–352.

BUTIN, H., 1954: Physiologisch-ökologische Untersuchungen über den Wasserhaushalt und die Photosynthese von Flechten. Biol. Zbl. *73*, 459–502.

CARLSON, R. W., BAZZAZ, F. A., ROLFE, G. L., 1975: The effect of heavy metals on plants II. Environmental Research *10*, 113–120.

DE KONING, H. W., JEGIER, Z., 1970: Effects of SO_2 and O_3 on *Euglena gracilis*. Atmos. Environ. *4* (4), 357–361.

ENSGRABER, A., 1954: Über den Einfluß der Antrocknung auf die Assimilation von Moosen und Flechten. Flora *141*, 432–475.

FARRAR, J. F., 1973: Lichen physiology: Progress and pitfalls. In (FERRY, B. W BADDELEY, M. S., HAWKSWORTH, D. L., eds.) Air pollution and lichens, The Athlone Press Univ., London. pp. 238–282.

FERENS, M. C., BEYERS, R. J., 1972: Studies of a simple laboratory microecosystem: Effects of stress. Ecology *53* (4), 709–713.

FLÜCKIGER, W., 1975: Der Einfluß aufgesprühter Bleilösungen auf physiologische Prozesse bei *Ricinus communis* L. Ber. der Eidgen. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, CH-8903, Nr. 142.

GARBER, K., 1967: Luftverunreinigungen und ihre Wirkungen. Gebr. Borntraeger, Berlin–Nikolassee.

GARBER, K., 1973: Luftverunreinigungen, eine Literaturübersicht. Ber. der Eidgen. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, CH-8903, Nr. 102.

GILBERT, O. L., 1970: A biological scale for the estimation of sulfur dioxide pollution. New Phytol. *69*, 629–634.

GILBERT, O. L., 1973: Lichens and air pollution. Ch. 13 in (AHMADJIAN, V., HALE, M. E., eds.) The Lichens, Academic Press, New York, London. pp. 443–472.

GSCHLIFFNER, CH., 1976: Die Wirkung einzelner und kombinierter Umweltgifte auf die Weitungsfähigkeit und Beweglichkeit von Spaltöffnungen des Amaryllis-Typs. Diss. Universität Wien.

HÄRTEL, O., 1976: Wie lassen sich Pflanzenschäden definieren? Umschau in Wissenschaft und Technik *76* (11), 347–348.

HÄRTEL, O., MIKLAU, S., 1971: Eine Methode zur Herstellung definierter niedriger SO_2-Spannungen. PflKrankh. *78*, 538–543.

HAMPP, R., ZIEGLER, H., 1974: Der Einfluß von Bleiionen auf die Enzyme der Chlorophyllbiosynthese. Z. Naturforsch. *29 c*, 552–558.

HENNSEN, A., JAHNS, H. M., 1974: Lichenes. Eine Einführung in die Flechtenkunde. G. Thieme Verlag, Stuttgart.

HÖLL, W., HAMPP, R., 1974: Blei in der Biosphäre, einige Aspekte. Naturw. Rundschau *27* (7), 272–276.

JAMES, P. W., 1973: The effect of air pollutants other than hydrogen fluoride and sulphur dioxide on lichens. Ch. 8 in (FERRY, B. W., BADDELEY, M. S., HAWKSWORTH, D. L., eds.) Air pollution and lichens, The Athlone Press Univ., London. pp. 143–175.

JÜRGING, P., 1972: Flechten – Bioindikatoren der Luftverunreinigung? Tagungsbericht der Gesellschaft für Ökologie, Tagung Gießen 1972, hrsg. von STEUBING, L., KUNZE, C., JÄGER, J. pp. 141–145.

JÜRGING, P., 1975: Epiphytische Flechten als Bioindikatoren der Luftverunreinigung. Bibliotheca Lichenologica Bd. 4. Verlag J. Cramer, FL–Vaduz.

KELLER, TH., 1974: Immissionsprobleme im Bereich von Industrie- und Nationalstraßen. Bündnerwald *27* (8), 241–246.

KIRSCHBAUM, U., KLEE, R., STEUBING, L., 1971: Flechten als Indikatoren für die Immissionsbelastung im Stadtgebiet von Frankfurt/Main. Staub *31* (1), 21–24.

KÖHLE, U., 1977: Möglichkeiten und Grenzen der Verwendung von Flechten als Bioindikatoren für Luftverschmutzung. Diss. Tübingen.

KRAUSE, G. H. M., KAISER, H., 1977: Plant response to heavy metals and sulphur dioxide. Environ. Pollut. *12*, 63–71.

LANGE, O. L., 1953: Hitze- und Trockenresistenz der Flechten in Beziehung zu ihrer Verbreitung. Flora *140*, 39–97.

LANGE, O. L., 1956: Zur Methodik der kolorimetrischen CO_2-Bestimmung nach Ålvik. Ber. Dtsch. Bot. Ges. *69*, 49–60.

LANGE, O. L., 1969: Die funktionelle Anpassung der Flechten an die ökologischen Bedingungen arider Gebiete. Ber. Dtsch. Bot. Ges. *82*, 3–22.

LAPINA, L. P., 1973: Effects of NaCl and Na_2SO_4 on functional activity of the photosynthetic approach in corn. Soviet Plant Physiol. *20* (4), 675–681.

MAIER, R., 1978: Bioindikation von Bleiwirkungen in Pflanzen unter Berücksichtigung von Zeit, Temperatur und Licht mit Hilfe enzymatischer Methoden. Habilitationsschrift Wien.

MÜLLER, J., 1957: Spezifischer Nachweis von SO_2-Rauchschäden an Pflanzen mit Hilfe von Blattpigmentanalysen. Naturwissenschaften *44*, 453.

MÜLLER, J., SCHNEIDER, K., KREEB, K., 1976: Ökologische Kausalität des natürlichen Flechtenvorkommens im Hinblick auf den Aussagegehalt der Flechten-Bioindikation. Zus.fassungen der Vorträge bei der DBG/VAB Botaniker-Tagung in Zürich.

NYLANDER, W., 1866: Les lichens du Jardin du Luxembourg. Bull. soc. bot. Fr. *13*, 364–372.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

PEARSON, L. C., 1973: Air pollution and lichen physiology: Progress and problems. Ch. 11 in (FERRY, B. W., BADDELEY, M. S., HAWKSWORTH, D. L., eds.) Air pollution and lichens, The Athlone Press Univ. London. pp. 224–237

PUNZ, W.: Der Einfluß isolierter und kombinierter Schadstoffe auf Flechten. I. Photosyntheseverlauf nach Schadstoffbehandlung. Photosynthetica, in pr.

PUNZ, W.: The effect of single and combined pollutants on lichen water content. Biologia plantarum, in pr.

REHWOLDT, R., MENAPACE, L. W., NERRIE, B., ALESSANDRELLO, D., 1972: The effect of increased temperature upon the acute toxicity of some heavy metal ions. Bull. of Environmental Contamination and Toxicology *8* (2), 91–96.

RICHARDSON, D. H. S., PUCKETT, K. J., 1973: Sulphur dioxide and photosynthesis in lichens. Ch. 13 in (FERRY, B. W., BADDELEY, N. S., HAWKSWORTH, D. L., eds.) Air pollution and lichens. The Athlone Press Univ., London.

RIEDL, H., 1978: Flechten als Bioindikatoren der Luftverunreinigung. Beiträge Umweltschutz, Lebensmittelangelegenheiten, Veterinärverwaltung, hrsg. Bundesministerium für Gesundheit und Umweltschutz *2*.

ROTHSCHEDL, R., 1976: Wasserhaushalt, Transpiration und Austrocknungsresistenz verschiedener Ruderalpflanzen nach Einzel- und kombinierter Schädigung durch Umweltgifte. Diss. Univ. Wien.

SCHOPFER, P., 1970: Experimente zur Pflanzenphysiologie. Freiburg, Rombach Verlag.

SCHUMM, F., 1975: Beiträge zur Photosyntheseleistung der Flechten und ihre Eignung als Maß zur Indikation der Immissionsbelastung der Luft. Diss. Hohenheim.

SEAWARD, M. R. D., 1976: Lichens in air-polluted environments: multivariate analysis of the factors involved. In (KÄRENLÄMPI, L., ed.) Proc. of the Kuopi Meeting on Plant Damages Caused by Air Pollution. pp. 57–63.

SMITH, D. G., 1962: Biology of lichen thalli. Biol. Rev. *37*, 537–570.

STEUBING, L., 1977: Wirkungen von Luftverunreinigungen auf Pflanzen; Pflanzen als Bioindikatoren. Kap. 5.5.2. in (BUCHWALD/ENGELHARDT, eds.) Handbuch für Planung, Gestaltung und Schutz der Umwelt, Bd. 2. BLV München – Bern – Wien.

STOCKER, O., 1956: Wasseraufnahme und Wasserspeicherung bei Thallophyten. In (RUHLAND, W.) Handbuch der Pflanzenphysiologie III, Springer Verlag Berlin – Göttingen – Heidelberg. pp. 160–172.

SUKOPP, H., 1972: Wandel von Flora und Vegetation in Mitteleuropa unter dem Einfluß des Menschen. Ber. über Landwirtschaft *50* (1), 112–139.

TAYLOR, O. C., EATON, F. M., 1966: Suppression of plant growth by nitrogen dioxide. Plant Physiol. *41*, 132–135.

THÜMMLER, R., 1941: Einige Beiträge zur physiologischen Analyse der Rauchschäden. Protoplasma *36*, 254–315.

TÜRK, R., CHRIST, R., 1978: Untersuchungen über den Flechtenbewuchs an Eichen im Stadtgebiet Salzburgs und über den Wasserhaushalt einiger charakteristischer Flechten. Phyton *18*, 107–126.

TÜRK, R., WIRTH, V., LANGE, O., 1974: CO_2-Gaswechseluntersuchungen zur SO_2-Resistenz von Flechten. Oecologia *15*, 33–64.

VERSEGHY, K., 1972: Saisonale Veränderungen des Chlorophyllgehalts einiger xerothermen Flechtenarten. Bot. Közlem. *59*. kötet. *2*. füzet.

WESTMAN, L., 1976: Relative effects of air pollution and habitat factors on lichens. In (KÄRENLÄMPI, L., ed.) Proc. of the Kuopi Meeting on Plant Damages Caused by Air Pollution, pp. 68–77.

WINKLER, S., 1977: Flechten und Moose als Bioindikatoren. In (FREY, W., HURKA, H., OBERWINKLER, F., eds.) Beiträge zur Biologie der niederen Pflanzen. Fischer, Stuttgart.

WINTER, Ch., 1975: Produktion und Photosynthese-Intensität einiger Gräser bei verschieden langen Photoperioden und bei Störlichtbestrahlung. Diss. Universität Wien.

WIRTH, V., TÜRK, R., 1974: Über die SO_2-Resistenz von Flechten und die mit ihr interferierenden Faktoren. Verh. Ges. f. Ökologie, Erlangen, pp. 173–179.

ZIEGLER, I., 1973: The effect of air-polluting gases on plant metabolism. Environmental Quality and Safety II. pp. 182–208. G. Thieme Publishes, Stuttgart, Academic Press, New York.

ZIEGLER, R., EGLE, K., 1965: Zur quantitativen Überprüfung der Chloroplastenpigmente I. Beitr. Biol. Pflanzen *41*, 11–37